



①⑨ BUNDESREPUB  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

①⑫ Übersetzung der  
europäischen Patentschrift

⑤① Int. Cl.<sup>6</sup>  
G 01 R 33/09

(9)

⑥⑦ EP 0 793 808 B 1

①⑩ DE 694 12 649 T 2

②① Deutsches Aktenzeichen:	694 12 649.7
⑧⑥ PCT-Aktenzeichen:	PCT/EP94/03836
⑧⑥ Europäisches Aktenzeichen:	95 900 764.2
⑧⑦ PCT-Veröffentlichungs-Nr.:	WO 96/16339
⑧⑥ PCT-Anmeldetag:	21. 11. 94
⑧⑦ Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung:	30. 5. 96
⑧⑦ Erstveröffentlichung durch das EPA:	10. 9. 97
⑧⑦ Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA:	19. 8. 98
④⑦ Veröffentlichungstag im Patentblatt:	15. 4. 99

⑦③ Patentinhaber:  
International Business Machines Corp., Armonk,  
N.Y., US

⑦④ Vertreter:  
Teufel, F., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 70569 Stuttgart

⑧④ Benannte Vertragsstaaten:  
DE, FR, GB

⑦② Erfinder:  
ALLENSPACH, Rolf, CH-8134 Adliswil, CH; WEBER,  
Wolfgang, Friedrich, CH-8004 Zürich, CH

⑤④ MAGNETORESISTIVER FÜHLER

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 694 12 649 T 2

Best Available Copy

BUNDESDRUCKEREI 02.99 902 315/336/3G

## B E S C H R E I B U N G

### Magnetoresistiver Fühler

Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf magnetoresistive Sensoren, insbesondere auf magnetoresistive Sensoren, die auf dem sogenannten "Spinventil"- oder "Riesenmagnetowiderstands (GMR)"-Effekt beruhen. Die Erfindung bezieht sich des weiteren auf Speichersysteme, in die derartige Sensoren zum Lesen von gespeicherter Information eingebaut sind. Der magnetoresistive Sensor der vorliegenden Erfindung ist außerdem auf jede beliebige lokalisierte Meßaufgabe oder jedes lokalisierte Meßproblem anwendbar, bei dem ein Magnetfeld in einem beschränkten Volumen oder Gebiet zu detektieren ist.

### HINTERGRUND DER ERFINDUNG

Der Stand der Technik offenbart einen magnetischen Lesewandler, der als ein magnetoresistiver (MR) Sensor oder Kopf bezeichnet wird und von dem gezeigt wurde, daß er in der Lage ist, Daten von einer magnetischen Oberfläche mit großen linearen Dichten zu lesen. Ein MR-Sensor detektiert Magnetfeldsignale durch die Widerstandsänderungen eines Leseelementes, das aus einem magnetischen Material gefertigt ist, in Abhängigkeit von der Stärke und Richtung des magnetischen Flusses, der durch das Leseelement abgetastet wird. Diese MR-Sensoren nach dem Stand der Technik arbeiten auf der Basis des anisotropen magnetoresistiven (AMR) Effektes, bei dem sich eine Komponente des Leseelementwiderstandes mit dem Quadrat des Cosinus des Winkels zwischen der Magnetisierung und der Richtung des Abtaststromflusses durch das Element ändert. Eine detailliertere Beschreibung des AMR-Effektes ist in "Memory, Storage, and Related Applica-

tions", D. A. Thompson et al., IEEE Trans. Mag. MAG-11, Seite 1039 (1975) zu finden.

In jüngerer Zeit wurde ein anderer, ausgeprägter magnetoresistiver Effekt beschrieben, bei dem die Änderung des Widerstandes eines magnetischen Schichtensors der spinabhängigen Transmission der Leitungselektronen zwischen den magnetischen Schichten durch eine nicht-magnetische Schicht hindurch und der begleitenden spinabhängigen Streuung von Elektronen an den Schichtgrenzflächen und innerhalb der ferromagnetischen Schichten zugeschrieben wird. Dieser magnetoresistive Effekt wird unterschiedlich als der "Riesenmagnetowiderstands" (GMR)- oder "Spinventil"-Effekt bezeichnet. Ein derartiger magnetoresistiver Sensor, der aus den geeigneten Materialien gefertigt ist, stellt eine verbesserte Empfindlichkeit und eine größere Änderung des Widerstands bereit, als in Sensoren beobachtet wird, die den AMR-Effekt verwenden. Bei diesem Typ von MR-Sensor ändert sich der Widerstand zwischen einem Paar von ferromagnetischen Schichten, die durch eine nicht-magnetische Schicht getrennt sind, in der Ebene mit dem Cosinus ( $\cos$ ) des Winkels zwischen der Magnetisierung in den zwei Schichten.

Das US-Patent Nr. US-A-4 949 039 von Grünberg beschreibt eine magnetische Schichtstruktur, die vergrößerte MR-Effekte liefert, verursacht durch eine antiparallele Ausrichtung der Magnetisierungen in den magnetischen Schichten. Grünberg beschreibt die Verwendung einer Austauschkopplung vom antiferromagnetischen Typ, um die antiparallele Ausrichtung zu erzielen, in der benachbarte Schichten aus ferromagnetischen Materialien durch eine dünne Zwischenschicht aus Cr oder Y getrennt sind.

Das US-Patent Nr. US-A-5 206 590 von Dieny et al. offenbart einen MR-Sensor, bei dem beobachtet wird, daß sich der Widerstand zwischen zwei nicht gekoppelten, ferromagnetischen Schichten

mit dem Cosinus des Winkels zwischen den Magnetisierungen der zwei Schichten ändert. Dieser Mechanismus erzeugt einen Magnetowiderstand, der auf dem Spinventileffekt beruht und für ausgewählte Kombinationen von Materialien vom Betrag her größer als der AMR ist.

Das US-Patent Nr. US-A-5 159 513 von Dieny et al. offenbart einen MR-Sensor, der auf dem oben beschriebenen Effekt beruht und zwei Dünnschichten aus ferromagnetischem Material beinhaltet, die durch eine Dünnschicht aus einem nicht-magnetischen, metallischen Material getrennt sind, wobei wenigstens eine der ferromagnetischen Schichten aus Kobalt oder einer Kobaltlegierung besteht. Die Magnetisierung der einen ferromagnetischen Schicht wird bei verschwindendem angelegtem externen Magnetfeld durch Austauschkopplung an eine antiferromagnetische Schicht (Element 18 in Figur 2 des US-Patents Nr. US-A-5 159 513) senkrecht zu der Magnetisierung der anderen ferromagnetischen Schicht gehalten.

Die veröffentlichte europäische Patentanmeldung EP-A-0 585 009 offenbart einen Sensor mit Spinventileffekt, bei dem eine antiferromagnetische Schicht und eine angrenzende, magnetisch weiche Schicht zusammenwirken, um die Magnetisierung einer ferromagnetischen Schicht festzuhalten oder zu pinnen. Die magnetisch weiche Schicht steigert die Austauschkopplung, die von der antiferromagnetischen Schicht bereitgestellt wird.

Die in den oben zitierten US-Patenten und der europäischen Patentanmeldung beschriebenen Spinventilstrukturen erfordern, daß die Richtung der Magnetisierung in einer der zwei ferromagnetischen Schichten in einer ausgewählten Orientierung derart festgehalten oder "gepinnt" wird, daß unter signalfreien Bedingungen die Richtung der Magnetisierung in der anderen ferromagnetischen Schicht, der "freien" Schicht, entweder senkrecht zu

(d.h. unter  $90^\circ$  zu) oder antiparallel zu (d.h. unter  $180^\circ$  zu) der Richtung der Magnetisierung der gepinnten Schicht orientiert ist. Wenn ein externes magnetisches Signal an den Sensor angelegt wird, dreht sich die Richtung der Magnetisierung in der nicht festgehaltenen oder "freien" Schicht bezüglich der Richtung der Magnetisierung in der gepinnten Schicht. Das Ausgangssignal des Sensors ist vom Ausmaß dieser Drehung abhängig. Um die Orientierung der Magnetisierung in der gepinnten Schicht aufrechtzuerhalten, ist ein Mittel zum Festhalten der Richtung der Magnetisierung erforderlich. Zum Beispiel kann, wie in den oben zitierten Dokumenten des Standes der Technik beschrieben, eine zusätzliche Schicht aus antiferromagnetischem Material angrenzend an die gepinnte ferromagnetische Schicht gebildet werden, um ein austauschgekoppeltes Vormagnetisierungsfeld und somit ein Festpinnen bereitzustellen. Alternativ kann eine angrenzende magnetisch harte Schicht verwendet werden, um eine harte Vormagnetisierung für die gepinnte Schicht bereitzustellen.

Eine weitere Alternative zur Bereitstellung einer ferromagnetischen Schicht mit einer festgehaltenen oder gepinnten Orientierung ist im US-Patent Nr. US-A-5 301 079 beschrieben, das für Cain et al. erteilt wurde. Es ist ein auf dem Spinventileffekt beruhender, magnetoresistiver Lesesensor offenbart, bei dem ein Abtaststrom, der in dem Sensorelement fließt, ein Vormagnetisierungsfeld erzeugt, das die Richtung der Magnetisierung in jeder ferromagnetischen Schicht unter einem gleich großen, jedoch entgegengesetzten Winkel  $\theta$  bezüglich der leichten magnetischen Achse einstellt, womit in Abwesenheit eines angelegten magnetischen Signals eine Winkeltrennung von  $2\theta$  bereitgestellt wird. Ein Anlegen des abzutastenden magnetischen Signals an diesen Sensor führt zu einer weiteren inkrementalen Drehung der Richtung der Magnetisierung von jeder ferromagnetischen

Schicht, wobei die Richtungen dieser zwei inkrementalen Drehungen entgegengesetzt sind.

Hinsichtlich des obigen Standes der Technik besteht eine Hauptaufgabe der vorliegenden Erfindung darin, einen auf dem Spinventileffekt beruhenden MR-Sensor bereitzustellen, bei dem weder eine antiferromagnetische Schicht, noch eine harte Vormagnetisierung, noch ein Schaltungsaufbau zur Erzeugung eines Vormagnetisierungsstroms erforderlich sind, um die Magnetisierungsrichtung in einer oder mehreren der ferromagnetischen Schichten festzuhalten.

In US-A-4 477 794 ist ein magnetoresistives Element offenbart. Darin wird ein anisotropes magnetoresistives Material verwendet, das ein Vorläufer der GMR-Anordnung ist. Außerdem werden Stufen in einem Substrat erzeugt und reproduzieren sich in der ferromagnetischen Schicht. Die Existenz von magnetischen Domänen, die durch nicht-reproduzierbares Schalten (Barkhausen-Effekt) Rauschen erzeugen, ist zu vermeiden. Dafür werden in einer ferromagnetischen Schicht relativ hohe Stufen erzeugt, die ein magnetostatisches Pinning darin erzeugen. Dabei handelt es sich um ein Feldpinning in einer bevorzugten Orientierung in Längsrichtung des Stabes, der durch die Stufen aufgebaut wird. Je höher die Stufen sind, desto besser ist das erzielte Resultat aufgrund der geometrischen Begrenzung der Kontaktfläche zwischen dem Material in den verschiedenen Stufen.

In Journal of Magnetism and Magnetic Materials 136 (1994), Seiten 335 bis 359, "Giant magnetoresistance in spin-valve multilayers" wird eine antiferromagnetische Schicht für das Pinning einer ferromagnetischen Schicht einer GMR-Anordnung verwendet. Hier ist die Feldrichtung ebenfalls nicht steuerbar, was bedeutet, daß die Felder der ferromagnetischen Schichten des GMR-Sensors lediglich parallel oder antiparallel orientiert sein

können, was zu einem Verlust an Linearität führt. Dies bedeutet außerdem, daß keine Abhängigkeit der Magnetisierungsrichtung von der Dicke der ferromagnetischen Schicht vorliegt.

#### ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

Die oben erwähnten und weitere Aufgaben und Vorteile werden gemäß den Prinzipien der vorliegenden Erfindung erzielt, wie sie in den beigefügten Ansprüchen dargelegt ist.

Gemäß der vorliegenden Erfindung ist die Topologie des Substrates derart, daß die Oberfläche des Substrats aus Bereichen besteht, die eine Serie von Stufen oder Terrassen mit parallelen Oberseiten bilden. Diese Stufen können nur in einer Richtung oder in mehr als einer Richtung über die Oberfläche des Substrats hinweg "laufen". Sie können derart sein, daß sich die Oberfläche des Substrates, als Ganzes betrachtet, in nur einer oder in mehr als einer Richtung bezüglich des "Niveaus" neigt, das durch die Oberseite eines speziellen der Bereiche definiert ist. Ein "fehlgeschnittenes" kristallines Substrat, das so geschnitten wurde, daß seine Oberseite nicht parallel zu der in Winkelrichtung nächstliegenden kristallographischen Ebene liegt, kann als derartiges Substrat verwendet werden.

Ein Spinventilsensor ebenfalls gemäß der vorliegenden Erfindung kann ein Substrat beinhalten, wobei die Seite des Substrates, auf der die erste ferromagnetische Schicht des Sensors angebracht ist, eine Mehrzahl von Stufen aufweist, deren mittlere Länge vorzugsweise zwischen 10 Å und 1.000 Å (1 nm bis 100 nm) liegt, wobei die Dicke von einer der ferromagnetischen Schichten des Sensors derart ist, daß die Magnetisierungsrichtung der Schicht gepinnt ist. Eine "gepinnte" Schicht ist eine, deren Anisotropie eine Richtung favorisiert und die eine ausreichend hohe Koerzitivfeldstärke besitzt, so daß diese Richtung unter

dem Einfluß von Magnetfeldern, die in Gebrauch auftreten, nicht geändert wird. Die mittlere Stufenhöhe beträgt vorzugsweise zwischen 1,5 Å und 30 Å (0,15 nm bis 3,0 nm).

Außerdem kann gemäß der vorliegenden Erfindung ein Spinventilsensor ein Substrat beinhalten, wobei die Seite des Substrates, auf der die erste ferromagnetische Schicht des Sensors angebracht ist, eine Mehrzahl von Stufen aufweist, wobei das mittlere Verhältnis der Stufenlänge zur Stufenhöhe der Stufen zwischen 5 und 570 liegt und die Dicke von einer der ferromagnetischen Schichten des Sensors derart ist, daß die Magnetisierungsrichtung der Schicht gepinnt ist.

Des weiteren gemäß der vorliegenden Erfindung kann ein Spinventilsensor ein kristallines Substrat beinhalten, bei dem die Seite des Substrats, auf der die Schichten des Sensors angebracht sind, nicht koplanar mit irgendeiner der kristallographischen Ebenen des Substrates ist, wobei die Dicke von einer der ferromagnetischen Schichten des Sensors derart ist, daß die Magnetisierungsrichtung der Schicht gepinnt ist. In einem derartigen Sensor liegt die Seite des kristallinen Substrates, auf der die Schichten des Sensors angebracht sind, vorteilhafterweise in einer Ebene, wobei die Senkrechte zu dieser Ebene einen Winkel ( $\alpha$ ) von wenigstens  $0,1^\circ$ , vorzugsweise wenigstens  $0,5^\circ$ , zur nächstgelegenen Kristallachse des kristallinen Substrates einschließt.

Die nächstgelegene Kristallachse, auf die oben Bezug genommen wird, ist die Achse der nächstgelegenen Kristallhauptebene. Diese Ebene ist diejenige spezielle der kristallographischen Ebenen, deren Senkrechte am dichtesten bei der Normalenrichtung derjenigen Ebene liegt, in der die Oberfläche des Kristalls liegt. Da die Senkrechten der Kristallhauptebenen, d.h. jene, die per Konvention mit kleinen Miller-Indizes bezeichnet sind,



z.B. kleiner als 3 ( $\langle 100 \rangle$ -Richtungen,  $[1-10]$ ,  $[110]$ ,  $[211]$ ,  $[221]$  etc.), Winkel von wenigstens etwa  $15^\circ$  zueinander bilden, kann ein Fachmann ohne weiteres die nächstgelegene Kristallebene zu einer gegebenen oder gewünschten Senkrechten zur Fläche des Substrats bestimmen.

Substrate, deren Oberflächen absichtlich unter einem kleinen Winkel zu der Richtung der nächstgelegenen atomaren Ebene des Kristalls geschnitten wurden, können dazu verwendet werden, ein Substrat zu erhalten, das in die Kategorien der vorliegenden Erfindung fällt. Alternativ kann die Mehrzahl von Stufen auf der Oberfläche des Substrats durch Polieren, epitaxiales Aufwachsen einer Pufferschicht mit einer leicht fehlangepaßten kristallinen Struktur auf ein normal geschnittenes Substrat, Sputtern und/oder geeignetes Dotieren erhalten werden. Diese letzteren Techniken sind für die Erzeugung von Substraten mit gekrümmten Oberflächen, d.h. nicht-planaren Oberflächen, und/oder für Substrate mit sich wiederholenden Mustern von Stufen besonders vorteilhaft. In ähnlicher Weise können die Schichten des Sensors durch Sputtern, epitaxiales Aufwachsen oder äquivalente Standardtechniken erzeugt werden. Das Substrat kann aus einem isolierenden oder einem halbleitenden Material bestehen und ist vorzugsweise aus Silicium.

Der Sensor der vorliegenden Erfindung beruht auf den Eigenschaften von Schichten, die auf Substraten angebracht sind, deren Oberflächen mit Stufen oder Terrassen versehen sind oder die mit einem kleinen Winkel zu der Richtung der nächstgelegenen kristallographischen Ebene geschnitten wurden. Diese Eigenschaften wurden durch die Erfinder der vorliegenden Anmeldung bestimmt und sind wie folgt: Die leichte Richtung uniaxialer Magnetisierung (oder "leichte Achse") und die Koerzitivfeldstärke für eine ferromagnetische Schicht auf einem mit Terrassen versehenen Substrat sind von der Dicke der ferromagneti-

schen Schicht abhängig. Insbesondere wird, wenn sich die Dicke der ferromagnetischen Schicht, die betrachtet wird, ändert, eine kritische Dicke erreicht, bei der sich die leichte Richtung uniaxialer Magnetisierung über einen schmalen Dickenbereich hinweg um  $90^\circ$  bezüglich ihrer Orientierung für Dicken vor dem Erreichen dieser kritischen Dicke dreht. Somit kann die leichte Richtung uniaxialer Magnetisierung einer ferromagnetischen Schicht dadurch eingestellt werden, daß sichergestellt wird, daß sie eine spezielle Dicke aufweist. Es wurde außerdem festgestellt, daß sich die Koerzitivfeldstärke einer ferromagnetischen Schicht stark ändert, wenn die Dicke der Schicht einen kritischen Wert überschreitet. Somit ist es möglich, die Koerzitivität einer ferromagnetischen Schicht dadurch einzustellen, daß sichergestellt wird, daß sie eine bestimmte Dicke besitzt. Für ein gegebenes ferromagnetisches Material treten die Änderung der leichten Richtung der Magnetisierung um  $90^\circ$  und die große Änderung der Koerzitivität bei gut definierten kritischen Werten der Dicke des ferromagnetischen Films auf. Der Wert der kritischen Dicke für die Änderung der Richtung der leichten Achse der Magnetisierung ist möglicherweise nicht der gleiche wie der Wert der kritischen Dicke für den Sprung in der Koerzitivität.

Als Beispiel für das Obige wurde festgestellt, daß eine auf ein fehlgeschnittenes kristallines Substrat aufgebrachte Kobaltschicht eine kritische Dicke im Bereich von  $45 \text{ \AA}$  ( $4,5 \text{ nm}$ ) aufweist, wobei oberhalb dieser Dicke die leichte Richtung uniaxialer Magnetisierung senkrecht zu jener war, die Schichten mit geringerer Dicke als diesem kritischen Wert zeigen. Außerdem wird festgestellt, daß die Koerzitivität einer Kobaltschicht mit einer Dicke von mehr als  $45 \text{ \AA}$  ( $4,5 \text{ nm}$ ), die auf einem fehlgeschnittenen Substrat angebracht ist, weit höher als jene einer Kobaltschicht mit geringerer Dicke ist.

Die Eigenschaft hoher Koerzitivität einer ferromagnetischen Schicht mit einer bestimmten Dicke auf einem fehlgeschnittenen Substrat trägt zu einem Festhalten oder Pinning der leichten Richtung uniaxialer Magnetisierung der Schicht bei. Dies ist äquivalent zu dem Pinning, das früher in Verbindung mit magnetoresistiven Sensoren erörtert wurde, jedoch ohne daß irgendeine zusätzliche externe Schicht erforderlich ist, um dies zu bewerkstelligen.

Die hohe Koerzitivität und die Änderung der Orientierung der leichten Richtung uniaxialer Magnetisierung um  $90^\circ$  kann vorteilhaft eingesetzt werden, indem zwei ferromagnetische Schichten aufgebaut werden, die nicht notwendigerweise aus dem gleichen Material bestehen und durch eine nicht-magnetische Abstandshalterschicht auf dem gleichen Substrat getrennt sind, wobei die eine ferromagnetische Schicht eine Dicke derart aufweist, daß sie eine hohe Koerzitivität aufweist und eine  $90^\circ$ -Drehung ihrer leichten Richtung uniaxialer Magnetisierung stattfindet, während die andere Schicht eine Dicke derart besitzt, daß sie eine niedrige Koerzitivität aufweist und diese Drehung nicht stattfindet. Mit anderen Worten, die Dicke von einer der Schichten liegt oberhalb der kritischen Dicken fürs Pinning und für die  $90^\circ$ -Drehung der leichten Achse, und die Dicke der anderen Schicht liegt unterhalb dieser kritischen Dicken. Eine derartige Anordnung stellt einen Spinventilsensor bereit. Es ist jedoch nicht notwendig, daß beide Schichten aus Materialien bestehen, deren magnetische Eigenschaften von der Dicke abhängen. Der Sensor kann aus einer Schicht, deren Eigenschaften dickenabhängig sind, und einer Schicht aus einem anderen Material bestehen, die entweder die freie oder die gepinnte Schicht bildet, unabhängig von ihrer Dicke.

Die Erfindung ist nicht auf ferromagnetische Schichten beschränkt, deren Koerzitivitätserhöhung und Änderung der leich-

ten Achse oberhalb einer kritischen oder Schwellwertdicke auftreten. Ein Spinventilsensor kann aus Materialien bestehen, bei denen diese Änderungen für Dickenwerte unterhalb einer kritischen Dicke auftreten. Was von Bedeutung ist, ist die Möglichkeit, den Wert der Koerzitivität und in bevorzugten Ausführungsformen auch die leichte Richtung uniaxialer Magnetisierung durch Festlegen der Schichtdicken einzustellen. Insbesondere führt dies durch geeignete Kombinationen von Schichtdicken zum Festhalten der Richtung der Magnetisierung von einer der Schichten, während die Richtung der Magnetisierung der anderen Schicht sich frei ändern kann. Bei einem Spinventilsensor gemäß der Erfindung sind die Richtungen seiner leichten Achsen außerdem durch geeignete Wahlen der Schichtdicke vorzugsweise auf einen Winkel von  $90^\circ$  eingestellt, um eine optimale Widerstandsänderung der Schichten für ein gegebenes, extern angelegtes, abzutastendes Magnetfeld zu erzielen.

Es ist ein Vorteil der vorliegenden Erfindung, daß der Spinventilsensor gemäß der Erfindung zwei ferromagnetische Schichten aufweisen kann, die durch eine nicht-magnetische Abstandshalterschicht getrennt sind, wobei die gepinnte ferromagnetische Schicht keine zusätzliche Pinning- oder Vormagnetisierungsschicht benötigt, um ihre Richtung der Magnetisierung festzuhalten oder zu "pinnen". Daher zeigt der Sensor gemäß der Erfindung eine verbesserte Empfindlichkeit, ohne die Herstellung der zusätzlichen Pinningschicht zu erfordern, die bei Spinventilsensoren nach dem Stand der Technik erforderlich sind. Dies führt zu einem Bauelement, das kleiner und leichter herzustellen ist als bekannte Spinventilsensoren. Die gepinnte Schicht kann die ferromagnetische Schicht sein, die der Fläche des Substrats am nächsten liegt, auf der die Schichten liegen, wobei in diesem Fall die zweite ferromagnetische Schicht, d.h. die weiter von dem Substrat entfernte der zwei Schichten, die freie Schicht ist. Diese Anordnung kann jedoch umgekehrt wer-

den. In einer weiteren Variante der Erfindung kann eine Pufferschicht zwischen das Substrat und die erste magnetische Schicht eingebracht werden, um die Deposition zu erleichtern oder als Schutzschicht.

Die kritischen Dickenwerte für Schichten, um die Effekte der Erfindung zu zeigen, sind von den beteiligten Materialien und von der Topologie des Substrates abhängig. Daher ist die Erfindung nicht auf ferromagnetische gepinnte Schichten mit den exakten Dicken der Beispiele dieser Beschreibung beschränkt, da diese Dickenwerte lediglich für eine spezielle Filmsubstanz und eine spezielle Topologie geeignet sind. Es wird jedoch ein Verfahren angegeben, das einen Fachmann in die Lage versetzt, die kritischen Dicken zu bestimmen, die das Einsetzen und den Abfall des Pinning-Effekts und der 90°-Drehung der leichten Achse für jede beliebige Kombination von ferromagnetischem Material und Substrattopologie markiert. Ferromagnete, wie Co, Ni, Fe oder Legierungen dieser Materialien miteinander, z.B. Permalloy, können für die ferromagnetischen Schichten verwendet werden. Diese Materialien können weitergehend mit anderen nicht-magnetischen Materialien legiert werden. Wie bereits oben erwähnt, brauchen die gepinnte und die freie ferromagnetische Schicht nicht beide aus dem gleichen Material bestehen.

Diese und weitere neuartige Merkmale, die als charakteristisch für die Erfindung angesehen werden, sind in den beigefügten Ansprüchen dargelegt. Die Erfindung selbst jedoch ebenso wie eine bevorzugte Weise der Verwendung sowie weitere Aufgaben und Vorteile derselben werden unter Bezugnahme auf die folgende detail von dem Substrat lierte Beschreibung illustrativer Ausführungsformen besser verständlich, wenn sie in Verbindung mit den begleitenden Zeichnungen gelesen wird.

#### BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Die Erfindung ist unten detailliert unter Bezugnahme auf die folgenden Zeichnungen beschrieben:

- FIG. 1 zeigt die Grundanordnung eines Spinventilsensors, wie er aus dem Stand der Technik bekannt ist.
- FIG. 2 zeigt die Grundanordnung des Spinventilsensors gemäß der vorliegenden Erfindung.
- FIG. 3 bis 4 zeigen Substrate gemäß der Erfindung in dreidimensionaler Ansicht.
- FIG. 5 bis 12 zeigen Substrate gemäß der Erfindung im Querschnitt.
- FIG. 13 zeigt die Koerzitivfeldstärke einer ferromagnetischen Schicht, welche die Pinningstärke der Schicht illustriert.
- FIG. 14 A bis C zeigen Hystereseschleifen einer freien Schicht und einer ferromagnetischen Schicht, die gemäß der Erfindung gepinnt wurde; und
- FIG. 15 A bis B zeigen Magnetisierungsbilder der freien und der gepinnten Schicht eines Spinventilsensors.

Zwecks Konsistenz der Darstellung wurden die FIG. 3 bis 6, 8, 11 und 12 so gezeigt, daß die Basis des Substrats und die Horizontale der Figur mit dem Niveau der Stufen in der Oberfläche des Substrats zusammenfallen. Die Erfindung umfaßt jedoch auch Substrate, deren Basen parallel zu der Ebene sind, in der die wirksame Oberfläche des Kristalls geschnitten wurde, d.h.

Substrate, deren Stufen bei Betrachtung im Querschnitt geneigt sind, wobei die Horizontale der Figur mit der Basis des Substrats zusammenfällt.

#### WEISE(N) ZUM AUSFÜHREN DER ERFINDUNG

Der GMR- oder 'Spinventil'-Effekt beruht auf der Tatsache, daß sich der Magnetowiderstand eines Paares von ferromagnetischen Schichten, die durch eine nicht-magnetische Abstandshalter-schicht getrennt sind, in Abhängigkeit von der relativen Orientierung der Magnetisierungsvektoren in den ferromagnetischen Schichten ändert. Es wird festgestellt, daß der Widerstand einen Extremwert (d.h. maximal oder minimal), wenn die magnetischen Schichten eine antiparallele Magnetisierung aufweisen, und den entgegengesetzten Extremwert annimmt, wenn die Magnetisierungen der Schichten parallel ausgerichtet sind. Diese Abhängigkeit des Widerstands von der Magnetisierungskonfiguration wird durch die Ungleichheit der Streuraten von Leitungselektronen mit Spin nach oben und Spin nach unten verursacht, sei es an den Grenzflächen zwischen den Schichten oder im Volumen.

Bei einem optimierten Sensor, der auf dem GMR-Effekt beruht, befinden sich seine ferromagnetischen Schichten in einem Einzeldomänenzustand, wobei die Magnetisierung einer Schicht (der "gepinnten" Schicht) entlang einer bestimmten Richtung festgehalten ist und die Magnetisierung der zweiten Schicht (der "freien" Schicht) ohne weiteres dem abzutastenden Magnetfeld folgen kann. Bei Verwendung zur Detektion des Magnetisierungszustands eines aufgezeichneten Datenbits ändert sich die freie Schicht von einer mehr parallelen zu einer mehr antiparallelen Ausrichtung relativ zu der gepinnten Schicht, wenn sukzessive zwei entgegengesetzt orientierte Bits abgetastet werden. Für einen optimierten linearen Betrieb des Bauelementes mit angelegtem Feld sollte die Magnetisierung der zwei Schichten unter

einem Winkel von  $90^\circ$  zueinander liegen, solange kein abzutastendes Magnetfeld vorliegt. In den Bauelementen des Standes der Technik wird dies durch Festhalten der Magnetisierung der gepinnten Schicht entlang ihrer harten Magnetisierungsrichtung typischerweise entweder durch Permanentmagnete oder durch Austauschkopplung mit einer antiferromagnetischen Schicht, z.B. FeMn, erreicht.

Figur 1 zeigt eine Explosionsansicht eines derartigen Spinventilsensors gemäß dem Stand der Technik, wie er zum Beispiel aus dem US-Patent Nr. US-A-5 159 523 bekannt ist. Die im US-Patent US-A-5 159 523 erörterten und dort in FIG. 2 dargestellten Schichten wurden jedoch in der umgekehrten Reihenfolge gegenüber jener aufgebaut, die im Stand der Technik von FIG. 1 der vorliegenden Anmeldung gezeigt ist.

FIG. 1 der vorliegenden Anmeldung weiter betrachtend, zeigt das Bezugszeichen 10 ein Substrat an. Eine auf dem Substrat angebrachte Schicht 14 ist eine ferromagnetische Schicht, deren Magnetisierungsrichtung durch den Pfeil auf ihrer Oberfläche angezeigt ist. Die Magnetisierungsrichtung der Schicht 14 wird durch die Bereitstellung einer zusätzlichen Schicht 12, die entweder aus einem antiferromagnetischen Material oder aus einem harten ferromagnetischen Material besteht, festgehalten oder "gepinnt".

Eine Schicht 16 ist eine nicht-magnetische Abstandshalterschicht. Eine Schicht 18 ist eine weitere ferromagnetische Schicht, deren Magnetisierungsrichtung in Abwesenheit eines zu messenden Magnetfeldes durch den horizontalen Pfeil auf ihrer Oberfläche angezeigt ist. Die Schicht 18 ist die freie Schicht. Die nach oben und nach unten geneigten Pfeile auf der Schicht 18 zeigen Richtungen an, in denen die Magnetisierung der Schicht unter dem Einfluß von verschiedenen extern angelegten,



zu messenden Magnetfeldern liegen kann. Derartige Änderungen der Magnetisierungsrichtung einer Schicht führen über den Spinventileffekt zu Änderungen des Widerstandes der Gruppe der Schichten 14, 16, 18. Dieser Widerstand wird herkömmlicherweise in der Längsrichtung der Schichten gemessen, d.h. zwischen der linken und der rechten Kante der Gruppe von Schichten in der in FIG. 1 gezeigten Orientierung.

Bei Verwendung zur Detektion des Zustands der Magnetisierung von Datenpunkten auf einem magnetischen Aufzeichnungsmedium wird der Spinventilsensor von FIG. 1 derart positioniert, daß wenigstens die Schicht 18 dem Magnetfeld unterworfen ist, das von dem Datenpunkt herrührt. Die übliche Bewegungsrichtung des magnetischen Aufzeichnungsmediums ist durch den Pfeil im Vordergrund von FIG. 1 dargestellt.

Figur 2 zeigt eine Explosionsansicht eines Sensors gemäß der Erfindung. Die Oberfläche des Substrates 20 ist mit Terrassen versehen und wird unten detaillierter beschrieben. Die Dicke von einer der ferromagnetischen Schichten 24 oder 28 ist größer als die kritische Dicke, die für das Pinnen der leichten Richtung uniaxialer Magnetisierung notwendig ist. Die andere ferromagnetische Schicht besitzt eine Dicke, die geringer als diese kritische Dicke ist, wodurch sich ihre Magnetisierungsrichtung ändern kann, wenn ein extern angelegtes Magnetfeld vorliegt. Diese letztere Schicht bildet daher die "freie" Schicht. Die Dicke von einer der ferromagnetischen Schichten 24 oder 28 sollte vorzugsweise größer als die kritische Dicke für eine Rotation ihrer leichten Richtung uniaxialer Magnetisierung um  $90^\circ$  sein, und die andere Schicht sollte vorzugsweise eine Dicke besitzen, die geringer als diese kritische Dicke ist. Daher bilden die leichten Achsen der zwei ferromagnetischen Schichten einen Winkel von  $90^\circ$  zueinander, wenn kein extern angelegtes Magnetfeld vorliegt. Dies optimiert das Ausgangssignal von dem

Sensor, es sind jedoch andere Orientierungen der leichten Achsen denkbar, z.B. wird weiterhin ein Signal erzeugt, wenn die Achsen parallel sind, wenn kein extern angelegtes, abzutastendes Magnetfeld vorliegt. Alternativ kann eine der Schichten aus einem Material bestehen, dessen magnetische Eigenschaften nicht dickenabhängig sind.

Der prinzipielle Unterschied der Anordnung gemäß der Erfindung und FIG. 2 von der Anordnung des Standes der Technik in FIG. 1 besteht darin, daß die Anordnung der Erfindung keine Pinning-Schicht 12 benötigt, um ein Pinning der Magnetisierungsrichtung von einer der ferromagnetischen Schichten 24 oder 28 sicherzustellen. Die Oberflächenstruktur des Substrats 20 in Kombination mit den Dicken der ferromagnetischen Schichten gewährleisten das Pinnen der Magnetisierungsrichtung von einer der Schichten, während die andere Schicht als die freie Schicht verbleibt.

Ein Verfahren zum Bestimmen der kritischen Dicken für Schichten aus verschiedenen ferromagnetischen Materialien ist wie folgt: Es sollte eine Anzahl von Substraten hergestellt werden, die unter einem bestimmten Winkel  $\alpha$  geschnitten sind, da dies der schnellste Weg zur Erzeugung einer mit Terrassen versehenen Oberfläche ist. Zunehmend dickere Schichten aus ferromagnetischem Material sollten durch irgendein beliebiges herkömmliches Verfahren auf verschiedene dieser Substrate aufgebracht und jede Substrat/Schicht-Konfiguration sollte hinsichtlich der Richtung uniaxialer Magnetisierung und Koerzitivität geprüft werden. Bei irgendeinem bestimmten Wert(en) der Schichtdicke ändern sich die leichte Achse und die Koerzitivität zwischen einer Konfiguration und der nächsten geprüft beträchtlich. Dies detektiert die kritischen Dicken, bei denen sich die leichte Richtung uniaxialer Magnetisierung um  $90^\circ$  dreht und bei denen die Koerzitivität steil ansteigt (oder abfällt).

Wenn präzisere Dickenwerte für diese Übergänge gewünscht sind, kann das Experiment mit einem anderen Satz von Substraten wiederholt werden, auf denen ferromagnetische Schichten mit Dicken erzeugt wurden, die etwas größer und etwas kleiner als die kritischen Dicken sind, die aus der ersten "grobe" Partie von Substraten bestimmt wurden.

Das obige Verfahren kann für andere Winkel  $\alpha$  wiederholt werden. Es ist zu erwarten, daß sich die kritischen Dicken oder die Schnittwinkel  $\alpha$  beziehungsweise die Abmessungen der Stufen der Substratoberfläche, die zu effektiven Spinventilsensoren führen, von den in dieser Anmeldung angegebenen numerischen Werten unterscheiden können, da nicht zu erwarten ist, daß sich verschiedene ferromagnetische Materialien identisch zu dem in dieser Anmeldung zitierten Kobalt-Beispiel verhalten. Die allgemeine Anwendbarkeit der Techniken der vorliegenden Erfindung ist derart, daß ein Fachmann erwartet, die Eignung verschiedener Materialien und Anordnungen zu untersuchen, bevor er sich für eine bestimmte Kombination von Schichtdicken, Winkel des Schnitts der Substratoberfläche und Schichtabfolge zur Bildung eines Sensors für eine spezielle Verwendung entscheidet. Alle derartigen Untersuchungen bilden Teil des Umfangs und der Anwendbarkeit der vorliegenden Erfindung, da diese Erfindung ein breites Feld möglicher Sensoranordnungen eröffnet, die bezüglich den Sensoren des Standes der Technik vereinfacht sind.

Der größte Fehlschnittwinkel eines Substrats, für den die Effekte der Erfindung überprüft wurden, beträgt  $6,0^\circ$ . Siehe Beispiel IV am Ende dieser Beschreibung. Es ist jedoch zu erwarten, daß die Effekte der Erfindung bis zu Fehlschnitten von wenigstens ungefähr  $10^\circ$  beobachtet werden, beruhend auf der Konsistenz der in dem Bereich bis zu und einschließlich  $6,0^\circ$  beobachteten Effekte.

Die Figuren 3 bis 12 sind schematische Darstellungen von Substraten, die zu den Effekten der Erfindung führen und die als das Substrat in der Anordnung von FIG. 2 verwendet werden können. Die Figuren 3 bis 12 sind Vergrößerungen, die nicht in allen Richtungen maßstäblich gezeichnet sind. Die Abfolge von gepinnten ferromagnetischer, nicht-magnetischer und freier ferromagnetischer Schicht eines Spinventilsensors ist auf diesen Substraten anzubringen. In FIG. 3 nehmen die Bereiche von Atomen auf der Substratoberfläche die Form von Stufen oder Terrassen an. Die Oberseite jeder Stufe beinhaltet eine der Schichten aus Atomen des kristallinen Materials, aus dem das Substrat hergestellt ist. Es wurde ein kristallines Substrat dargestellt, bei dem die Oberseiten seiner vier Stufen parallel zueinander verlaufen. Die Oberseiten der Stufen bestehen aus Bereichen von parallelen Ebenen der Kristallatome. Der mit S bezeichnete Pfeil zeigt die Richtung der Senkrechten zu der Oberseite einer Stufe an. Der mit P bezeichnete Pfeil zeigt die Richtung der Senkrechten zu der Ebene an, in der die Kristalloberfläche geschnitten wurde. Der Winkel zwischen den durch die Pfeile S und P bezeichneten Richtungen ist der Fehlschnittwinkel der Oberfläche des Substrats oder allgemein der Neigungs- oder Steigungswinkel  $\alpha$  der mit Terrassen versehenen Oberfläche. Es wird angenommen, daß ein Winkel  $\alpha$  von  $0,1^\circ$  bis  $10^\circ$  in einem Pinning entlang der erforderlichen Richtung einer darüberliegenden ferromagnetischen Schicht eines bestimmten Dickenbereiches resultiert und somit zu den Effekten der vorliegenden Erfindung führt. Wie in Beispiel II am Ende dieser Beschreibung erläutert, wurde festgestellt, daß für einen Testsensor der Dickenbereich von  $45 \text{ \AA}$  bis  $900 \text{ \AA}$  ( $4,5 \text{ nm}$  bis  $90 \text{ nm}$ ) für die gepinnte Schicht geeignet war, wenn diese aus Co bestand und das Kupfersubstrat einen Neigungswinkel  $\alpha$  von  $1,6^\circ$  aufwies. Ein weiterer Sensor wurde mit einem Fehlschnittwinkel  $\alpha$  von  $1,9^\circ$

aufgebaut, siehe Beispiel III. Eine etwas geringere minimale Dicke der gepinnten Schicht erwies sich mit einem Substratfehlschnitt von  $1,9^\circ$  funktionsfähig.

Die in den Figuren angegebene Abmessung L bezeichnet die Länge einer einzelnen Stufe. In ähnlicher Weise gibt die Abmessung H die Höhe einer einzelnen Stufe an. Die Abmessung W stellt lediglich die Breite des speziellen dargestellten Abschnitts des Substrats dar und kann allgemein so interpretiert werden, daß sie die Breitenrichtung zeigt. Wenngleich gezeigt wurde, daß die in FIG. 3 dargestellten Stufen eine ungefähr gleiche Länge aufweisen, wird angenommen, daß die Effekte der Erfindung durch jede beliebige Gruppe von Stufen erzielt werden, deren Hauptlänge innerhalb des Bereichs von  $10 \text{ \AA}$  bis  $1.000 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ nm}$  bis  $100 \text{ nm}$ ) liegt. Eine Messung des Widerstands des Sensors kann entweder in jeder beliebigen Richtung parallel zu der Ebene der Schichten durchgeführt werden, was bevorzugt ist, oder in einer Richtung senkrecht zu der Ebene der Schichten, was möglicherweise ein verbessertes Signal liefert, jedoch schwerer durchzuführen ist.

Figur 4 stellt ein Substrat dar, bei dem die Stufen in mehr als einer Richtung über die Oberfläche hinweg "laufen". Dies resultiert aus einem Fehlschnitt des Kristalls derart, daß die Substratoberfläche in einer Ebene liegt, deren Schnittlinie mit der Oberseite der Stufen nicht parallel zu irgendeiner der in den FIG. 3 oder 4 gezeigten Stufenkanten verläuft. In diesem Fall wiederholt sich der in FIG. 4 gezeigte Schnitt der Substratoberfläche in der Richtung "ins Papier hinein".

Die in den FIG. 3 bis 12 gezeigten verschiedenen Bereiche bestehen aus Atomebenen, die sich hinsichtlich der Höhe um eine oder mehr atomare Dicken oder "Monoschichten" unterscheiden. Die in den FIG. 3 bis 12 gezeigten Substrate induzieren ein

Pinning auf darüberliegenden ferromagnetischen Schichten geeigneter Dicke, vorausgesetzt, daß die mittlere Länge  $L$  der Stufen auf der gesamten Oberfläche zwischen  $10 \text{ \AA}$  und  $1.000 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ nm}$  beziehungsweise  $100 \text{ nm}$ ) beträgt, oder daß das mittlere Verhältnis der Stufenlänge zur Stufenhöhe zwischen 5 und 570 liegt. Die Stufen können von gleicher Höhe sein, müssen es jedoch nicht. Typische Stufenhöhen  $H$  liegen im Bereich von  $1,5 \text{ \AA}$  bis  $30 \text{ \AA}$  ( $0,15 \text{ nm}$  bis  $3,0 \text{ nm}$ ). Es wird angenommen, daß sich der Fehlschnittwinkel des Kristalls, der zu den Effekten der Erfindung führt, zwischen  $0,1^\circ$  und  $10^\circ$  erstreckt. Der Winkel beträgt jedoch vorzugsweise wenigstens  $0,5^\circ$ . Für einen Substratfehlschnitt von  $0,5^\circ$  beträgt die mittlere Stufenlänge ungefähr  $200 \text{ \AA}$  ( $20 \text{ nm}$ ), und das mittlere Verhältnis von Stufenlänge zu Stufenhöhe beträgt ungefähr 110. Für einen Substratfehlschnitt von  $6,0^\circ$  beträgt die mittlere Stufenlänge ungefähr  $17 \text{ \AA}$  ( $1,7 \text{ nm}$ ), und das mittlere Verhältnis von Stufenlänge zu Stufenhöhe beträgt ungefähr 10.

Um weitere topographische Anordnungen von Substratoberflächen darzustellen, die verwendet werden können, um die der Erfindung zugrundeliegenden Effekte zu erzielen, wird auf die FIG. 5 bis 12 Bezug genommen. Die Figuren 5 bis 12 zeigen Querschnitte von Substraten. Jede gezeigte Stufenhöhe stellt eine oder mehrere Schichten von Atomen dar. Die Stufen sind in dieser Darstellung als "scharf" gezeigt: In Wirklichkeit sind sie aufgrund der diskreten Natur der Atome, aus denen sie bestehen, abgerundet oder weniger regelmäßig. Die Aspekte der Substrate der FIG. 5 bis 12, die von spezieller Relevanz für die Erfindung sind, sind:

FIG. 5: Stufen mit gleicher Länge.

FIG. 6: Stufen mit ungleicher Länge.

FIG. 7: Steigungen in zwei entgegengesetzten Richtungen weg von einem mittleren Spitzenwert; dreidimensionale Ansicht.

Fig. 8: Stufen mit ungleichen Höhen und ungleichen Längen.

FIG. 9 und 12 Keine Nettosteigung, jedoch ein sich wiederholendes Muster von Stufen.

FIG. 10: Ein Fehlschnitt mit variablem Gradient, d.h. keine einzelne Fehlschnittebene, sondern eine gekrümmte Oberseite.

FIG. 11: Sich wiederholendes Muster von ungleicher Stufenlänge.

Die Geometrie von jeder der FIG. 5 bis 12 kann in der nicht in der Figur gezeigten Richtung der Substratoberfläche, d.h. in der Richtung "in die Seite hinein", wiederholt werden. Alternativ kann das Oberflächenprofil des Substrates in die Richtung "in die Seite hinein" die Form von jenem in irgendeiner anderen der FIG. 5 bis 12 gezeigten annehmen, sofern es die Substratherstellungstechniken erlauben und vorausgesetzt, daß die Symmetrie der Anordnung höchstens zweifach, insbesondere nicht vierfach, bleibt, so daß eine bevorzugte Magnetisierungsrichtung erzielt und festgehalten werden kann. Substrate gemäß der Erfindung können in die Kategorien von einem oder mehreren der beigefügten unabhängigen Ansprüche fallen, z.B. hat das Substrat von FIG. 10 keine einzelne Ebene, wie in Anspruch 4 definiert, da die Substratoberfläche gekrümmt ist, kann jedoch mit Stufen gemäß jedem der beigefügten Ansprüche aufgebaut sein.

Die Schichten des Sensors können in der entgegengesetzten Reihenfolge zu jener in dem generalisierten Spinventilsensor von Fig. 2 gezeigten aufgebaut sein, d.h. die gepinnte Schicht kann am weitesten von dem Substrat entfernt sein, wobei die freie Schicht zwischen dem Substrat und der gepinnten Schicht liegt. Die gepinnte Schicht bleibt in dieser Konfiguration gepinnt, vorausgesetzt daß ihre Dicke innerhalb des Bereiches liegt, der für ein Pinning notwendig ist, obwohl die freie und die nicht-magnetische Schicht zwischen ihr und dem Substrat liegen. Des weiteren bleibt die freie Schicht frei und ist keinem Pinning unterworfen, vorausgesetzt daß ihre Dicke nicht innerhalb des Bereiches liegt, der für das Pinning notwendig ist. Die Dicke der freien Schicht in Beispiel II am Ende dieser Beschreibung muß unterhalb der kritischen Dicke liegen, die das Einsetzen des Pinnings markiert.

Aus ähnlichen Gründen kann ein Sensor aufgebaut werden, welcher der Reihenfolge nach aus einem Substrat / einer gepinnten Schicht / einer nicht-magnetischen Schicht / einer freien Schicht / einem Abstandshalter / einer gepinnten Schicht / einer nicht-magnetischen Schicht / einer freien Schicht ...etc. besteht, wiederum vorausgesetzt, daß die Dicken der verwendeten freien und gepinnten Schichten jeweils unterhalb und innerhalb des Bereiches liegen, der für das Auftreten von Pinning notwendig ist, und daß eine nicht-magnetische Abstandshalterschicht zwischen jeder freien Schicht und angrenzenden gepinnten Schicht vorgesehen ist. In ähnlicher Weise kann die Reihenfolge Substrat / freie Schicht / nicht-magnetische Schicht / gepinnte Schicht / Abstandshalter / freie Schicht / nicht-magnetische Schicht / gepinnte Schicht / Abstandshalter etc. oder Substrat / gepinnte Schicht / nicht-magnetische Schicht / freie Schicht / Abstandshalterschicht / freie Schicht / nicht-magnetische Schicht / gepinnte Schicht etc. verwendet werden. Zusätzliche



Pufferschichten können eingebracht werden, wann immer dies zweckmäßig ist.

Insbesondere wird es als sicher innerhalb des Umfangs der Erfindung betrachtet, wenn das Substrat mit einer zusätzlichen Pufferschicht bedeckt wird, bevor irgendwelche der ferromagnetischen oder nicht-magnetischen Schichten 24 bis 28, wie in FIG. 2 gezeigt, aufgebracht werden. Eine derartige Pufferschicht wird zum Beispiel wichtig, wenn eine Fehlanpassung in der Kristallstruktur der Pufferschicht und des (ursprünglichen) Substrats ausgenutzt wird, um eine Oberfläche mit Stufen herzustellen - ein Verfahren, das in MRS Bulletin, Juni 1991, Seiten 30 bis 33 von C. P. Flynn beschrieben wird. Durch ähnliche Techniken können auch weitere Abschirmschichten bereitgestellt werden.

Der Sensor der vorliegenden Erfindung ist insbesondere geeignet, um die magnetischen Wandler in einem magnetischen Speichersystem zu bilden, wie eine Festplatteneinheit oder eine ähnliche Vorrichtung. Der Wandler liest den Zustand der Magnetisierung des magnetischen Aufzeichnungsmediums, das sich dicht am Wandler in einer Ebene senkrecht, oder in mehr als  $80^\circ$ , zu der Ebene bewegt, in der die Schichten des Sensors liegen.

Ein Sensor gemäß der vorliegenden Erfindung kann dazu verwendet werden, das Vorhandensein eines Magnetfeldes zu detektieren oder es zu messen. Insbesondere kann der Sensor in einer Vielzahl von Abmessungen aufgebaut werden, und es wird erwartet, daß er speziell zur Detektion des Vorhandenseins von Magnetfeldern von 0,001 Oe bis 100 Oe (0,00008 kA/m bis 8,0 kA/m) oder zu deren Messung geeignet ist. Da der Sensor sehr klein hergestellt werden kann, ist er insbesondere auch für die Messung und Detektion von Magnetfeldern geeignet, die von begrenzter räumlicher Ausdehnung sind oder die in Bereichen existieren, zu

denen nur begrenzter Zugriff besteht. Anwendungsfelder sind somit bei der Erderforschung, wie Bergbau und Ölbohrungen, oder in der Messung kleiner Magnetfelder zu finden, die vom menschlichen Körper erzeugt werden.

#### BEISPIEL I

Eine Teststruktur gemäß der Erfindung besteht aus zwei Co-Schichten, die durch eine nicht-magnetische Cu-Abstandshalterschicht getrennt sind. Ein sehr kleiner Fehlschnitt des nominell (100)-orientierten Cu-Substrates induziert eine große uniaxiale magnetische Anisotropie in dem Co-Film.

Betrachtet man Teststrukturen mit allmählich zunehmender Dicke, klappt der Co-Film bei einer bestimmten Dicke  $d_c$  abrupt seine leichte Magnetisierungsrichtung um  $90^\circ$  in eine Richtung um, in der die Orientierung bleibt, selbst bei Anlegen von externen Magnetfeldern von der Größe, die durch einen Spinventilsensor im Gebrauch detektiert werden soll. Der Co-Film wurde somit gepinnt und hat eine Drehung seiner leichten Achse von  $90^\circ$  gezeigt. Für Filme mit einer Dicke  $d > d_c$  wird die Koerzitivfeldstärke um mehr als einen Faktor zwei im Vergleich zu den dünneren Filmen gesteigert. Daher kann ein Sensor gemäß der vorliegenden Erfindung einen uniaxialen Co-Film mit  $d > d_c$  als gepinnte Schicht, eine Cu-Abstandshalterschicht, die dick genug ist, um lediglich eine sehr geringe Kopplung zu zeigen, sowie eine freie abtastende Schicht besitzen.

Bei Verwendung als Detektor für den Magnetisierungszustand eines Datenpunkts auf einem magnetischen Speichermedium klappt die freie Co-Schicht in dem Streufeld der geschriebenen Bits um und induziert folglich den GMR-Effekt durch Änderung von einer mehr parallelen zu einer mehr antiparallelen Ausrichtung zu der gepinnten Co-Schicht.

In der oben beschriebenen Teststruktur ist die Abtastschicht eine dünne Co-Schicht, jedoch könnten weichmagnetische Schichten, wie Permalloy-Schichten, bevorzugt sein. Der Fehlschnitt des Substrats, d.h. das Schneiden der Oberseite des Substrats derart, daß diese Oberfläche in einer Ebene liegt, die nicht mit einer ausgezeichneten Ebene der Kristallatome zusammenfällt, erzeugt die zuvor erwähnten "Bereiche" auf der Kristalloberfläche.

## BEISPIEL II

Filme mit verschiedenen Dicken wurden auf die Oberseite von Cu<100>-Einkristallen aufgewachsen, die um  $1,6^\circ$  im wesentlichen entlang der [110]-Richtung in der Ebene fehlgeschnitten waren. Dies rief eine hohe uniaxiale Oberflächenanisotropie hervor, wobei die [1-10]-Richtung gegenüber der [110]-Richtung (die auf einem perfekt orientierten <100>-Substrat äquivalent sind) für dünne Filme bevorzugt ist. Bei einer Dicke von  $d_c \approx 45 \text{ \AA}$  bis  $54 \text{ \AA}$  (4,5 nm bis 5,4 nm) klappte die leichte Magnetisierungsrichtung von der [1-10]-Richtung in die [110]-Richtung diskontinuierlich um und verblieb entlang dieser Richtung für Filme mit einer Dicke bis zu  $900 \text{ \AA}$  (90 nm). Der wichtige Parameter für eine funktionierende Sensorvorrichtung ist die Koerzitivfeldstärke, wie in Fig. 13 dargestellt. Die wesentliche Tatsache besteht darin, daß die Koerzitivität für Filme mit  $d > d_c$  hoch ist, in der Größenordnung von  $50 \text{ Oe}$  bis  $100 \text{ Oe}$  ( $4 \text{ kA/m}$  bis  $8 \text{ kA/m}$ ), und somit behalten diese Filme ihre Magnetisierung, die entlang der [110]-Richtung ausgerichtet ist, selbst in den abzutastenden externen Feldern bei. Typische Hystereschleifen, wie sie durch den magneto-optischen Kerr-Effekt beobachtet werden, sind in FIG. 14 gezeigt. Entlang der [110]-Richtung zeigt der dicke Film eine rechteckige Schleife mit einer Restmagnetisierung, die gleich der Sättigungscharakteristik einer leichten Richtung (FIG. 14A) ist, während entlang der [1-10]-Richtung die Schleife die Existenz einer Zwischenachse zeigt (Fig. 14B).

Zum Vergleich zeigt die Hysterese entlang der  $[1-10]$ -Richtung für einen dünnen Film ( $d = 9 \text{ \AA} < d_c$ ) ( $= 0,9 \text{ nm} < d_c$ ) die umgeklappte leichte Achse (FIG. 14C). Die Hystereseschleifen enthalten somit die Information, die notwendig ist, um die leichte Achse und die Koerzitivität eines speziellen Films zu bestimmen. Eine Anwendung dieses Verfahrens auf die Filme mit verschiedenen Dicken stellt ein Mittel bereit, um die Werte der kritischen Dicken für einen speziellen Film und ein spezielles Substrat zu bestimmen.

Der Substratfehlschnitt von  $1,6^\circ$  resultiert in einer mittleren Stufenlänge von ungefähr  $64 \text{ \AA}$  ( $6,4 \text{ nm}$ ) und einem mittleren Verhältnis von Stufenlänge zu Stufenhöhe von 35. Die Beobachtung, daß ein Umklappen der Magnetisierungsrichtung bei einer großen Dicke auftritt, muß einer hohen Oberflächenanisotropie zugeschrieben werden. Die Beobachtung, daß Filme mit einer Dicke bis zu  $900 \text{ \AA}$  ( $90 \text{ nm}$ ) uniaxiales Verhalten zeigen, beweist, daß Volumenanisotropien für die leichte  $[110]$ -Richtung in dem dicken Film verantwortlich sind. Beide dieser Anisotropien können nicht mit einer einfachen Projektion der auf  $\langle 100 \rangle$ -Oberflächen beobachteten Anisotropien auf die Fehlschnittoberfläche identifiziert werden, da der Fehlschnittwinkel viel zu klein ist, um die dramatische Anisotropieänderung von der vierfachsymmetrischen  $\langle 100 \rangle$ -Oberfläche zu der Zweifachsymmetrie auf der  $\langle 100 \rangle$ -Fehlschnittoberfläche zu erklären.

Eine funktionierende Vorrichtung besteht aus einer dicken gepinnten Co-Schicht, einem nicht-magnetischen Abstandshalter und einer freien abtastenden Schicht. Als ein erster Schritt wurden eine dünne Co-Schicht, wie oben beschrieben, als freie Schicht und eine Cu-Schicht als Abstandshalter gewählt. In dieser Konfiguration wurde verifiziert, daß die Beobachtungen von dem einzelnen Co-Film reproduziert werden; d.h. die magnetischen Eigenschaften einer Co-Schicht werden dadurch, daß sie als Teil

einer geschichteten Co/Cu/Co/Cu<100>-Probe aufgewachsen wird, nicht geändert. FIG. 15A zeigt ein Magnetisierungsbild einer Probe mit Co14/Cu180/Co90/Cu<100> (Zahlen ohne Klammern geben die Dicke in Angström an, 1,4 nm, 18 nm beziehungsweise 9 nm), wobei die freie Schicht auf dem oberen Teil und zwecks Vergleich die gepinnte Schicht auf dem unteren Teil des Bildes freiliegen. Die Magnetisierungsrichtungen der freien und gepinnten Co-Schichten in dieser Co/Cu/Co/Cu<100>-Struktur sind die gleichen wie für Co-Schichten mit den gleichen Dicken, die einzeln auf einem Cu-Substrat angebracht sind und einen Winkel von 90° umschreiben. Das Anlegen eines Magnetfelds, das größer als die Koerzitivfeldstärke der freien Schicht ist, klappt die freie Schicht ohne Einfluß auf die gepinnte Schicht um, siehe FIG. 15B. Beide Schichten verbleiben in einem Einzeldomänenzustand. Die oben angegebenen Dickenwerte gelten lediglich für einen Co-Film als der gepinnten Schicht.

### BEISPIEL III

Eine ähnliche Probe wie jene in Beispiel II wurde so hergestellt, daß die Oberfläche des Substrats absichtlich unter einem Winkel von 1,9° zu der nächstgelegenen Ebene von Atomen geschnitten wurde. Es wurde festgestellt, daß die Magnetisierungsrichtung einer auf diesem Substrat angebrachten ferromagnetischen Schicht gepinnt ist. Die mittlere Länge der Stufen auf der Oberfläche des Substrats entsprechend einem Fehlschnitt von 1,9° beträgt ungefähr 54 Å (5,4 nm). Das entsprechende mittlere Verhältnis von Stufenlänge zu Stufenhöhe beträgt ungefähr 30.

### BEISPIEL IV

Eine weitere ähnliche Probe zu Beispiel II wurde so hergestellt, daß die Oberfläche des Substrats unter einem Winkel von 6,0° zu der nächstgelegenen Ebene von Atomen geschnitten wurde. Es wurde festgestellt, daß die Richtung der Magnetisierung ei-

ner auf diesem Substrat angebrachten ferromagnetischen Schicht gepinnt war. Die mittlere Länge der Stufen auf der Substratoberfläche entsprechend einem Fehlschnitt von  $6,0^\circ$  beträgt ungefähr  $17 \text{ \AA}$  ( $1,7 \text{ nm}$ ). Das entsprechende mittlere Verhältnis von Stufenlänge zu Stufenhöhe beträgt ungefähr 10.

#### BEISPIEL V

In den zuvor beschriebenen Testsensoren wurde Kupfer als Substrat verwendet. Für einen magnetoresistiven Kopf muß das metallische einkristalline  $\text{Cu}\langle 100 \rangle$ -Substrat durch ein isolierendes oder halbleitendes Material ersetzt werden. Es wurde zuvor gezeigt, daß  $\text{Si}\langle 100 \rangle$  diesem Zweck dient. Tatsächlich wurde sogar gezeigt, daß  $\text{Co/Cu/Si}\langle 100 \rangle$  epitaxial aufwächst. Es wurde verifiziert, daß Cu in großen Terrassen (mehrere hundert  $\text{\AA}$  (mehrere zehn nm)) auf der Oberseite von  $\text{Si}\langle 100 \rangle$  in epitaxialer  $\langle 100 \rangle$ -Orientierung aufwächst, nachdem die Cu-Silicid-Bildung aufhört. Daher liegt das uniaxiale Verhalten der Co-Filme auf der Oberseite eines fehlgeschnittenen  $\text{Cu}\langle 100 \rangle$ -Einkristalls auch vor, wenn sie auf fehlgeschnittenen  $\text{Si}\langle 100 \rangle$ -Wafern, die mit einem  $\text{Cu}\langle 100 \rangle$ -Film bedeckt sind, aufgewachsen sind. Der Sensor gemäß der Erfindung kann daher eine dünne Pufferschicht, z.B. aus Kupfer, direkt oberhalb des Substrats aufweisen, auf welche dann die Schichten des Sensors angebracht werden.

Kürzlich wurde gezeigt, daß dünne epitaxiale Filme auch durch Sputtern auf orientierte Substrate aufgewachsen werden können. Insbesondere kann  $\text{Co/Cu}\langle 100 \rangle$  auf  $\text{MgO}(100)$  aufgesputtert werden. Daher ist die Erfindung ebenfalls auf gesputterte Proben anwendbar, die auf fehlgeschnittenen Substraten aufgewachsen wurden.

Die freie Schicht eines GMR-Kopfes muß eine kleine Koerzitivfeldstärke aufweisen, um eine Drehung der Magnetisierungsrichtung in sehr kleinen Feldern ohne weiteres zu erlauben. Der

freie Co-Film der obigen Struktur wurde in jener Hinsicht nicht optimiert. Insbesondere ist die Erfindung nicht auf Co-Schichten beschränkt. Die dünne Co-Schicht zeigt einfach, daß ein dünner magnetischer Film, der auf einer fehlgeschnittenen Oberfläche aufgewachsen ist, uniaxial ist. Eine dünne Permalloy-Legierung kann zur Werkstoffstellung desselben ausgewählt werden, jedoch mit kleinerer Anisotropie. Der Vorteil mit einer Permalloy-Legierung besteht darin, daß hier die leichte Magnetisierungsachse ohne weiteres gemäß den Anforderungen z.B. durch Variieren des Sputterdrucks oder Anlegen von Magnetfeldern, während der Deposition maßgeschneidert werden kann.

## A N S P R Ü C H E

1. Spinventilsensor mit einem Substrat (20), wobei diejenige Seite des Substrats (20), auf der wenigstens zwei ferromagnetische Schichten (24, 28) durch eine nicht-magnetische Schicht (26) voneinander getrennt angebracht sind, eine Mehrzahl von Stufen aufweist, wobei die Dicke von einer der ferromagnetischen Schichten (24, 28) des Sensors derart ist, daß die Magnetisierungsrichtung dieser einen Schicht gepinnt ist, wobei die Magnetisierungsrichtung dieser einen ferromagnetischen Schicht von der Dicke abhängig ist.
2. Sensor nach Anspruch 1, wobei die mittlere Stufenhöhe (H) zwischen  $1,5 \text{ \AA}$  und  $30 \text{ \AA}$  ( $0,15 \text{ nm}$  und  $3,0 \text{ nm}$ ) liegt und/oder dessen mittlere Stufenlänge (L) zwischen  $10 \text{ \AA}$  und  $1.000 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ nm}$  und  $100 \text{ nm}$ ) beträgt.
3. Sensor nach Anspruch 1, wobei das mittlere Verhältnis der Stufenlänge (L) zur Stufenhöhe (H) der Stufen zwischen 5 und 570 beträgt.
4. Sensor nach Anspruch 1 mit einem kristallinen Substrat (20), wobei diejenige Seite des Substrats, auf der wenigstens zwei ferromagnetische Schichten (24, 28) angebracht sind, nicht koplanar mit irgendeiner der kristallographischen Hauptebenen des Substrats ist, wobei die Dicke von einer der ferromagnetischen Schichten (24, 28) derart ist, daß die Magnetisierungsrichtung dieser einen Schicht gepinnt ist.
5. Sensor nach Anspruch 4, wobei diejenige Seite eines kristallinen Substrats (20), auf der die ferromagnetischen



Schichten (24, 28) angebracht sind, in einer Ebene liegt, bei der die Senkrechte (P) zu der Ebene einen Winkel ( $\alpha$ ) von wenigstens  $0,1^\circ$ , vorzugsweise wenigstens  $0,5^\circ$ , mit der nächstliegenden Kristallachse (S) des kristallinen Substrats bildet.

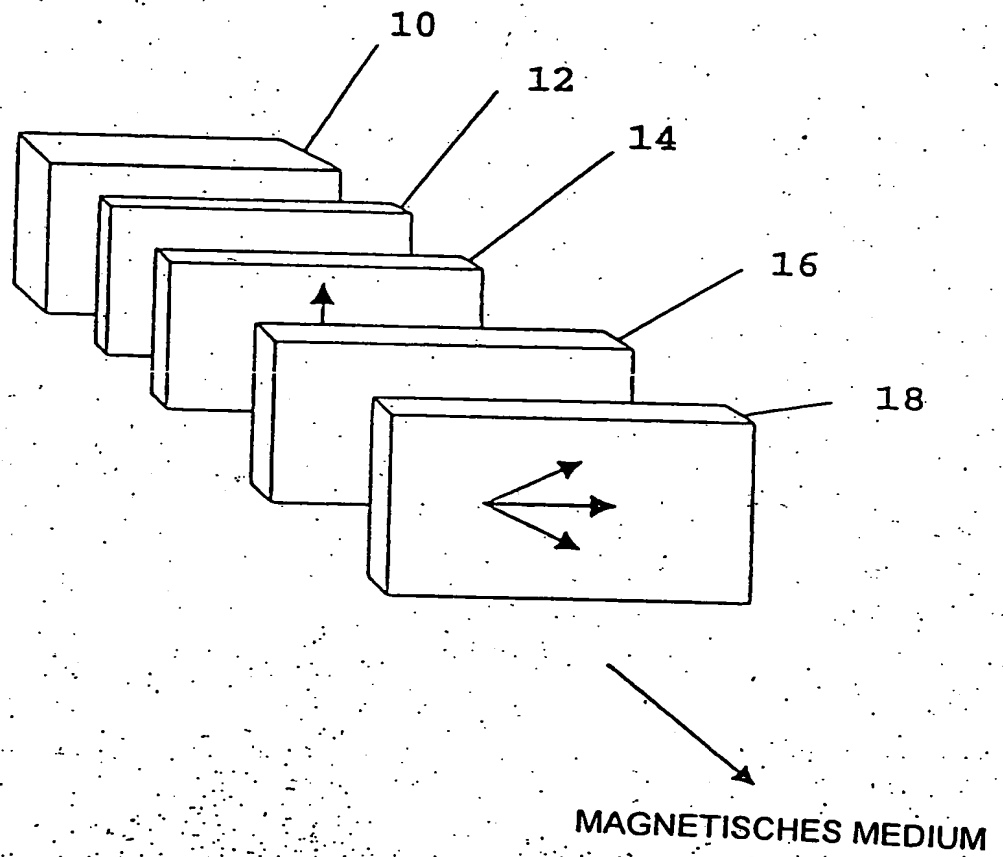
6. Sensor nach Anspruch 1, wobei die Dicke der ersten ferromagnetischen Schicht (24) des Spinventilsensors größer als oder gleich der minimalen Dicke ist, die erforderlich ist, damit die Magnetisierungsrichtung der ersten Schicht gepinnt ist, und die Dicke der zweiten ferromagnetischen Schicht (28) kleiner als die minimale Dicke ist, die erforderlich ist, damit die Magnetisierungsrichtung der zweiten Schicht gepinnt ist.
7. Sensor nach Anspruch 1, wobei die Dicke der zweiten ferromagnetischen Schicht (28) des Spinventilsensors größer als oder gleich der minimalen Dicke ist, die erforderlich ist, damit die Magnetisierungsrichtung der zweiten Schicht gepinnt ist, und die Dicke der ersten ferromagnetischen Schicht (24) kleiner als die minimale Dicke ist, die erforderlich ist, damit die Magnetisierungsrichtung der ersten Schicht gepinnt ist.
8. Sensor nach Anspruch 1, wobei die Dicke der ersten ferromagnetischen Schicht (24) des Spinventilsensors größer als die maximale Dicke ist, bei der die Magnetisierungsrichtung der ersten Schicht gepinnt ist, wodurch die erste ferromagnetische Schicht (24) eine freie Schicht bildet, und die Dicke der zweiten ferromagnetischen Schicht (28) kleiner als oder gleich der maximalen Dicke ist, bei der die Magnetisierungsrichtung der zweiten Schicht gepinnt ist.

9. Sensor nach Anspruch 1, wobei die Dicke der zweiten ferromagnetischen Schicht (28) des Spinventilsensors größer als die maximale Dicke ist, bei der die Magnetisierungsrichtung der zweiten Schicht gepinnt ist, wodurch die zweite ferromagnetische Schicht (28) eine freie Schicht bildet, und die Dicke der ersten ferromagnetischen Schicht (24) kleiner als oder gleich der maximalen Dicke ist, bei der die Magnetisierungsrichtung der ersten Schicht gepinnt ist.
10. Sensor nach Anspruch 1, wobei die Dicken der ferromagnetischen Schichten (24, 28) des Spinventilsensors derart sind, daß die Richtung der leichten Achse von einer der Schichten einen Winkel von etwa  $90^\circ$  zu der Richtung der leichten Achse der anderen Schicht bildet.
11. Sensor nach Anspruch 1, wobei eine der ferromagnetischen Schichten (24, 28) des Sensors aus einem Material besteht, dessen magnetische Eigenschaften nicht von der Dicke dieser einen Schicht abhängig sind.
12. Sensor nach Anspruch 1, wobei die Seite des Substrates (20) eine Mehrzahl von flachen Bereichen beinhaltet, wobei jeder flache Bereich aus einer freiliegenden Schicht von Atomen des Substrats besteht.
13. Sensor nach Anspruch 12, wobei die freiliegenden Schichten von Atomen des Substrats (20) in parallelen Ebenen liegen.
14. Sensor nach Anspruch 4, wobei das Substrat (20) einkristallin ist.

15. Sensor nach Anspruch 1, wobei die Stufen in mehr als einer Richtung über die Oberfläche des Substrats (20) hinweg verlaufen.
16. Sensor nach Anspruch 1, wobei die ferromagnetischen Schichten (24, 28) des Sensors entweder Kobalt, Nickel, Eisen oder Permalloy beinhalten oder daraus bestehen.
17. Sensor nach Anspruch 1, wobei die ferromagnetischen Schichten (24, 28) des Sensors Kobalt, Nickel oder Eisen in Legierung miteinander und/oder mit anderen nicht-magnetischen Materialien beinhalten oder daraus bestehen.
18. Sensor nach Anspruch 16 oder 17, wobei die gepinnte ferromagnetische Schicht und die freie ferromagnetische Schicht des Sensors verschiedene Materialien beinhalten oder aus diesen bestehen.
19. Sensor nach Anspruch 1, wobei eine Schicht aus nicht-magnetischem Material (26) zwischen beiden ferromagnetischen Schichten (24, 28) in dem Sensor Kupfer beinhaltet oder daraus besteht.
20. Sensor nach Anspruch 1 oder Anspruch 4 oder Anspruch 14, wobei das Substrat (20) ein isolierendes oder halbleitendes Material, vorzugsweise Silicium, beinhaltet oder daraus besteht.
21. Sensor nach Anspruch 1, wobei das Substrat (20) eine zusätzliche Pufferschicht auf der Oberfläche aufweist, wobei auf dieser Pufferschicht die erste ferromagnetische Schicht (24) angebracht ist.

22. Sensor nach Anspruch 21, wobei die Pufferschicht Kupfer beinhaltet oder daraus besteht.
23. Sensor nach irgendeinem vorhergehenden Anspruch, wobei der Aufbau von Schichten (24, 26, 28), der den Sensor ausmacht, einmal oder mehrmals mit einer nicht-magnetischen Abstandshalterschicht zwischen angrenzenden freien und gepinnten Schichten wiederholt wird.
24. Magnetisches Speichersystem mit:  
einem magnetischen Speichermedium zum Aufzeichnen von Daten; und  
  
einem magnetischen Wandler, der während einer Relativbewegung zwischen dem magnetischen Wandler und dem magnetischen Speichermedium dicht bei dem magnetischen Speichermedium gehalten wird, wobei der magnetische Wandler einen Sensor gemäß Anspruch 1 beinhaltet.
25. Speichersystem nach Anspruch 24, wobei die Relativbewegung derart ist, daß sich das magnetische Speichermedium relativ zu dem magnetischen Wandler in einer Ebene bewegt, die unter einem Winkel von  $80^\circ$  oder mehr zu der Ebene liegt, in der die Schichten (24, 26, 28) des Sensors liegen, und bevorzugt senkrecht zu dieser ist.
26. Verwendung eines Sensors gemäß Anspruch 1, um das Vorhandensein eines Magnetfeldes zu detektieren oder dieses zu messen.
27. Verwendung eines Sensors gemäß Anspruch 26, um das Vorhandensein eines Magnetfeldes zwischen 0,001 Oe und 100 Oe (0,00008 kA/m und 8,0 kA/m) zu detektieren oder dieses zu messen.

28. Vorrichtung für geomagnetische Messungen oder Untersuchungen, die einen Sensor gemäß Anspruch 1 beinhaltet.
29. Vorrichtung für magnetische Messungen am menschlichen Körper, die einen Sensor gemäß Anspruch 1 beinhaltet.
30. Verfahren zur Herstellung eines Spinventilsensors, das einen Schritt zum Aufbringen von wenigstens zwei ferromagnetischen Schichten (24, 28) und einer trennenden, nicht-magnetischen Schicht (26) auf ein Substrat (20) mit einer terrassierten oder gestuften Seite beinhaltet, wobei die Dicke von einer der ferromagnetischen Schichten (24, 28) derart gewählt ist, daß die Magnetisierungsrichtung dieser einen Schicht gepinnt ist, wobei die Magnetisierungsrichtung dieser einen ferromagnetischen Schicht von der Dicke abhängig ist.



*Fig.1* (STAND DER TECHNIK)

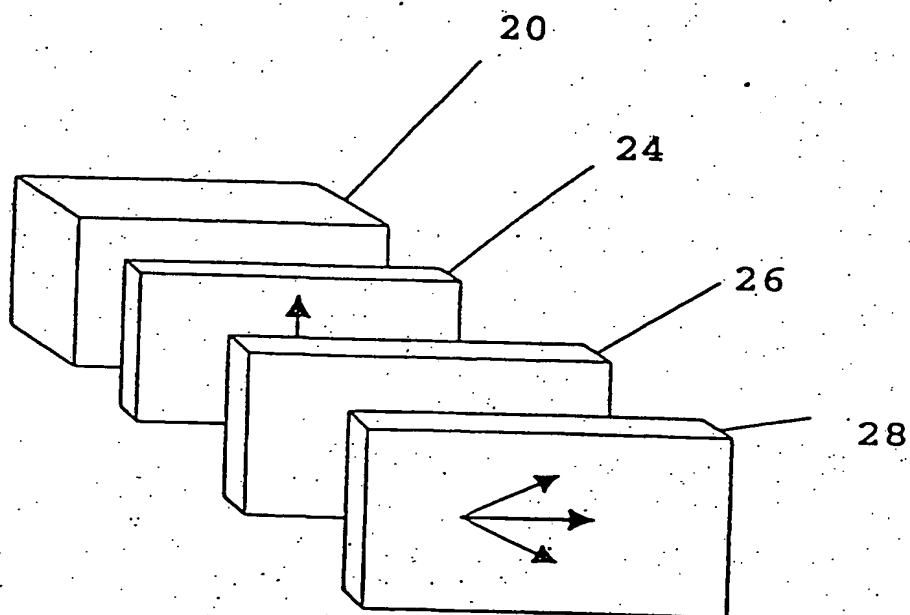


Fig.2

MAGNETISCHES MEDIUM

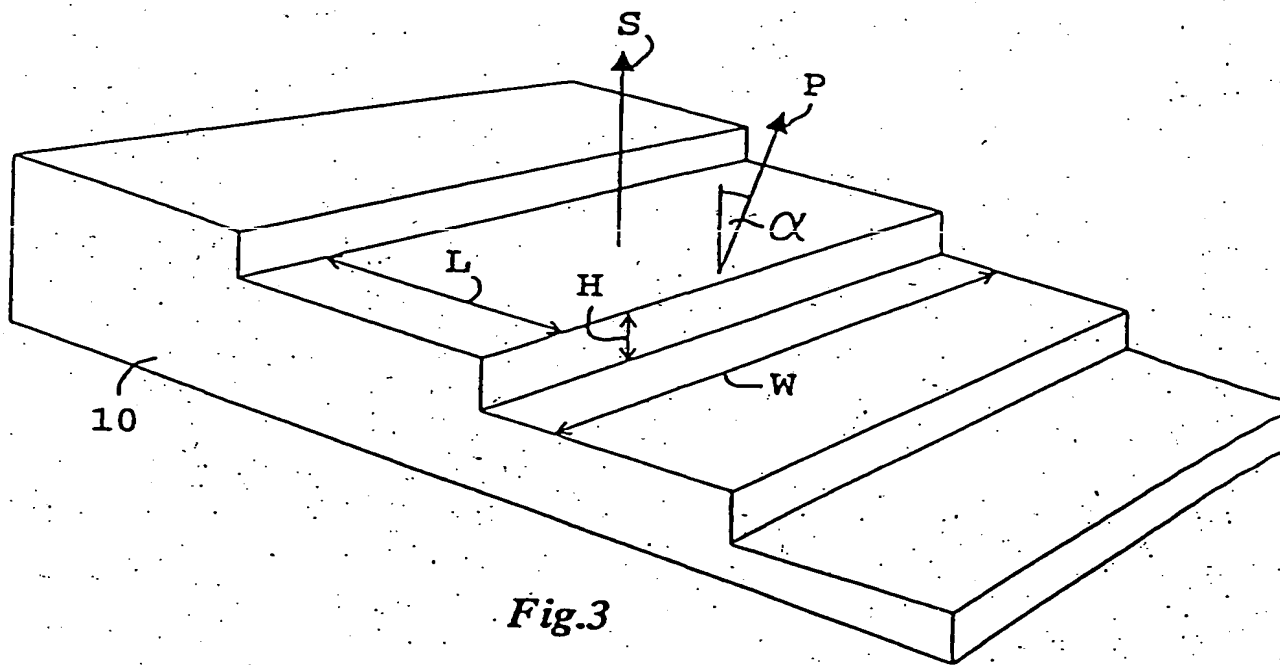
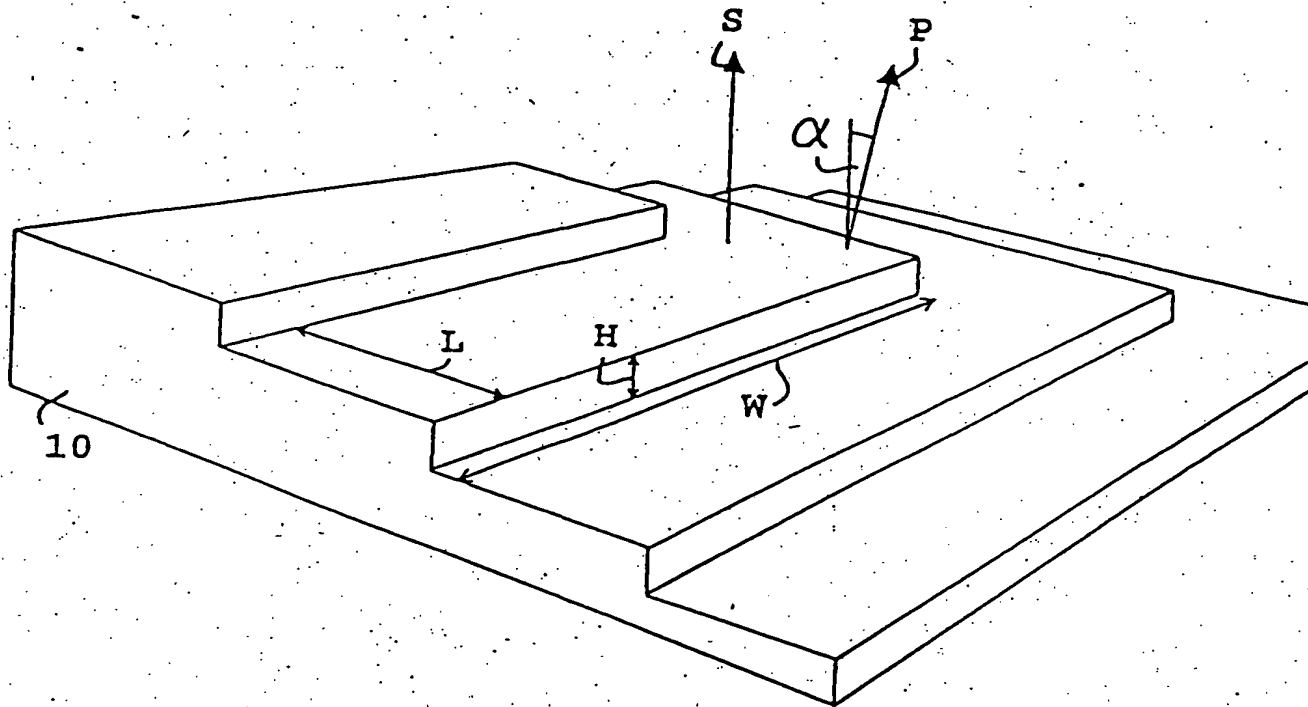


Fig.3



*Fig.4*

5/11

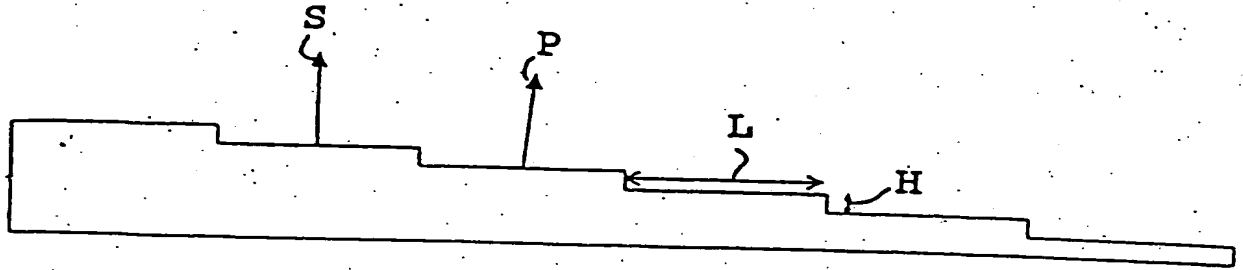


Fig. 5

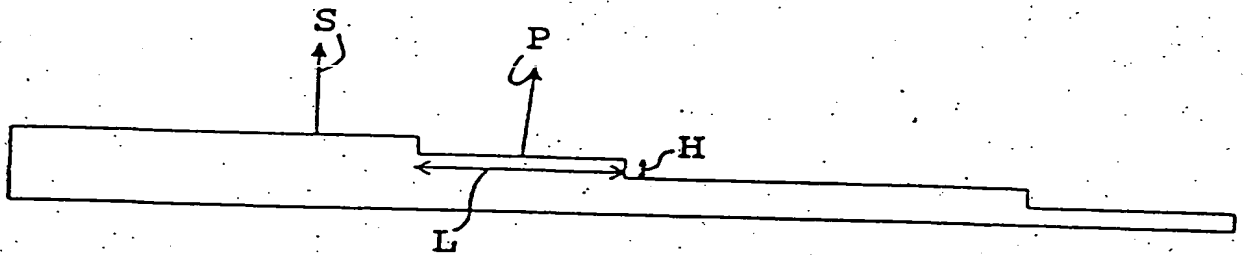


Fig. 6

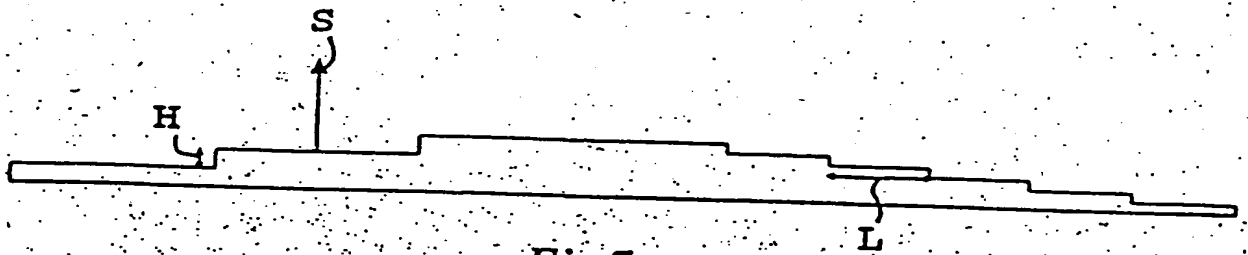


Fig. 7

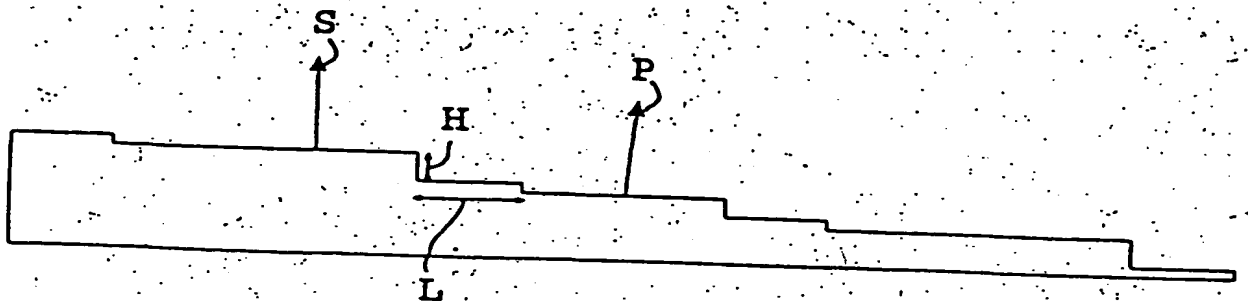


Fig. 8

6/11

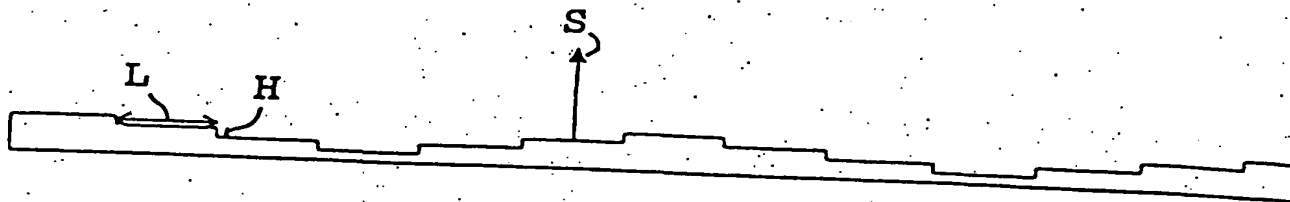


Fig.9

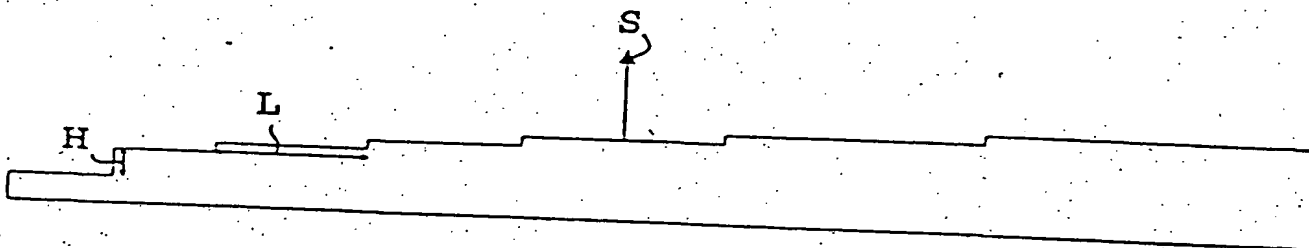


Fig.10

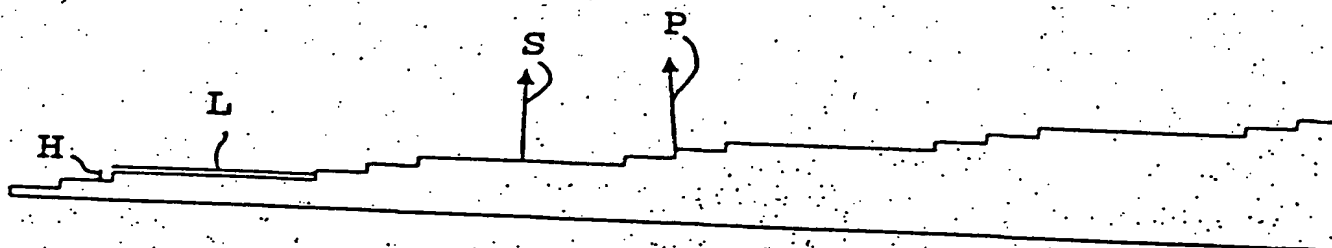


Fig.11

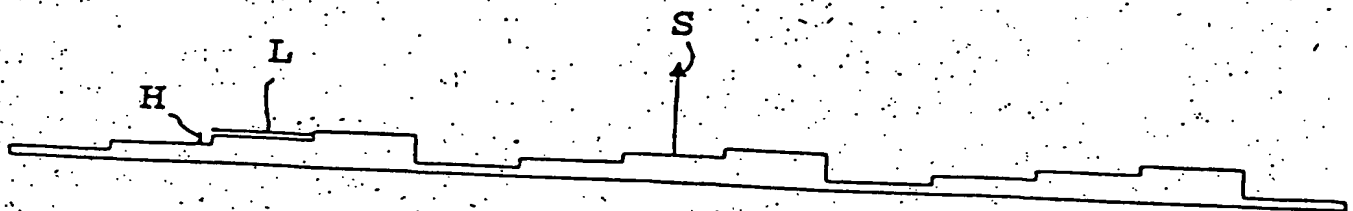


Fig.12

171100

7/11

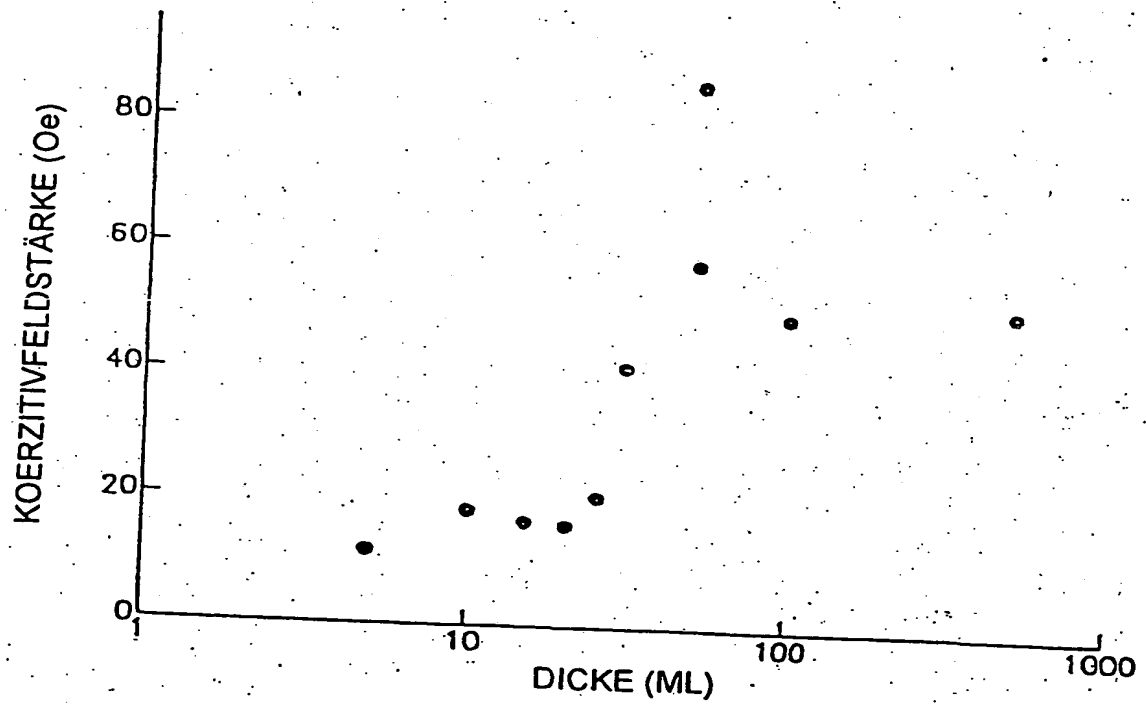


Fig.13

1100

8/11

$d > d_c; H \parallel [1-10]$

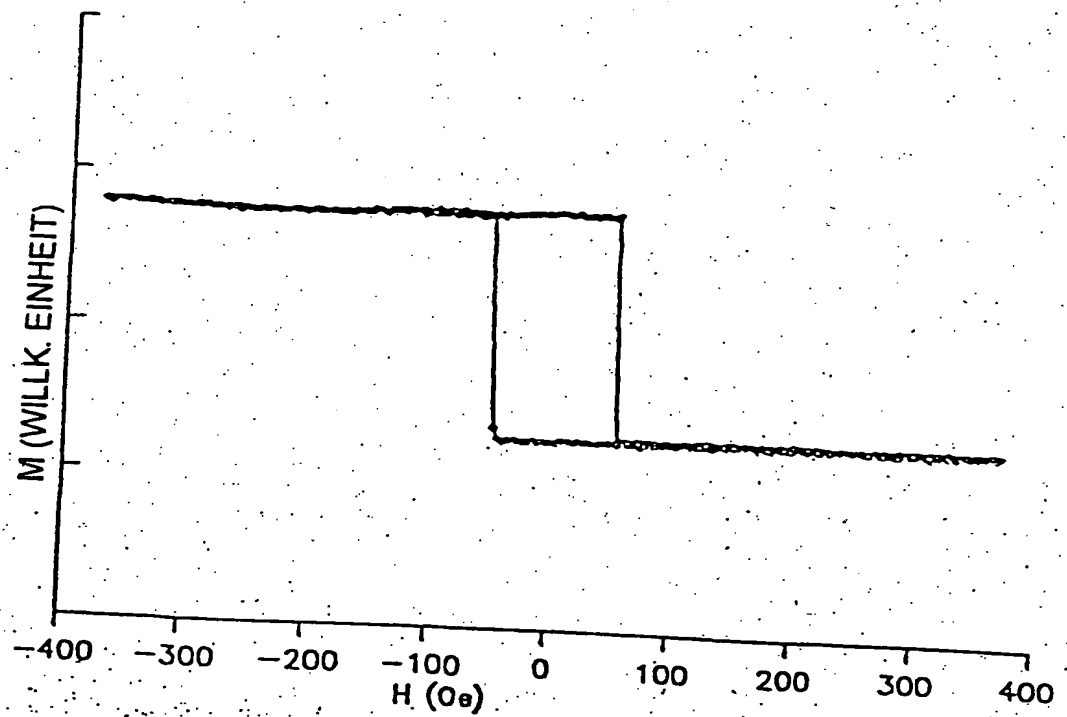


Fig. 14A

9/11

$d > d_c; H \parallel [110]$

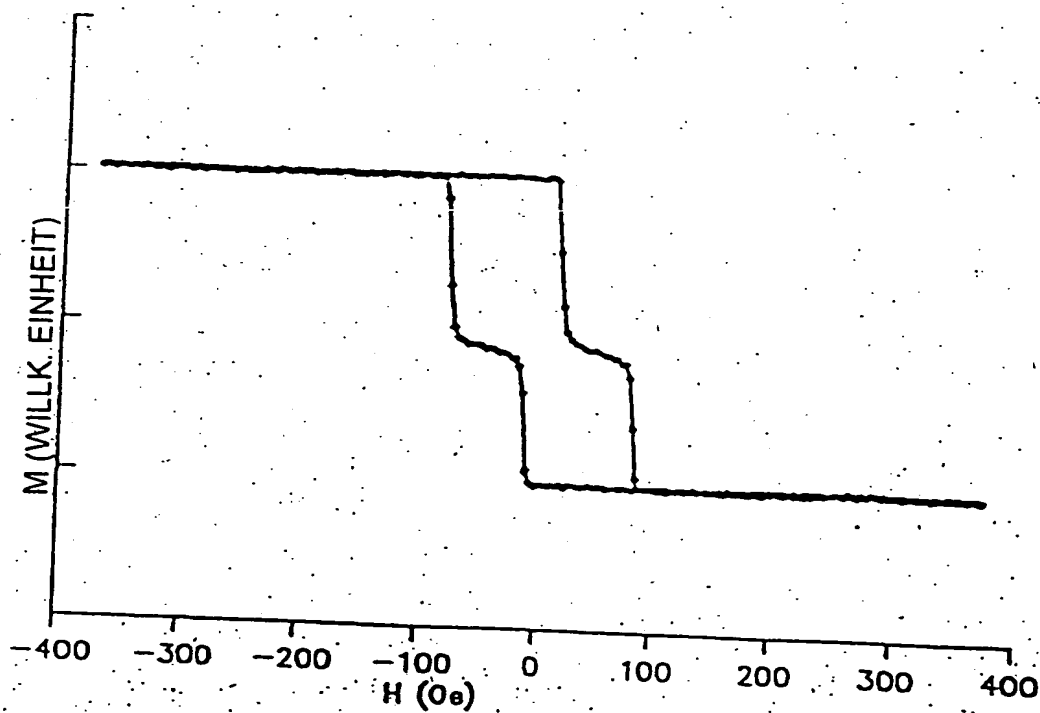


Fig.14B

10/11

$d < d_c; H \parallel [110]$

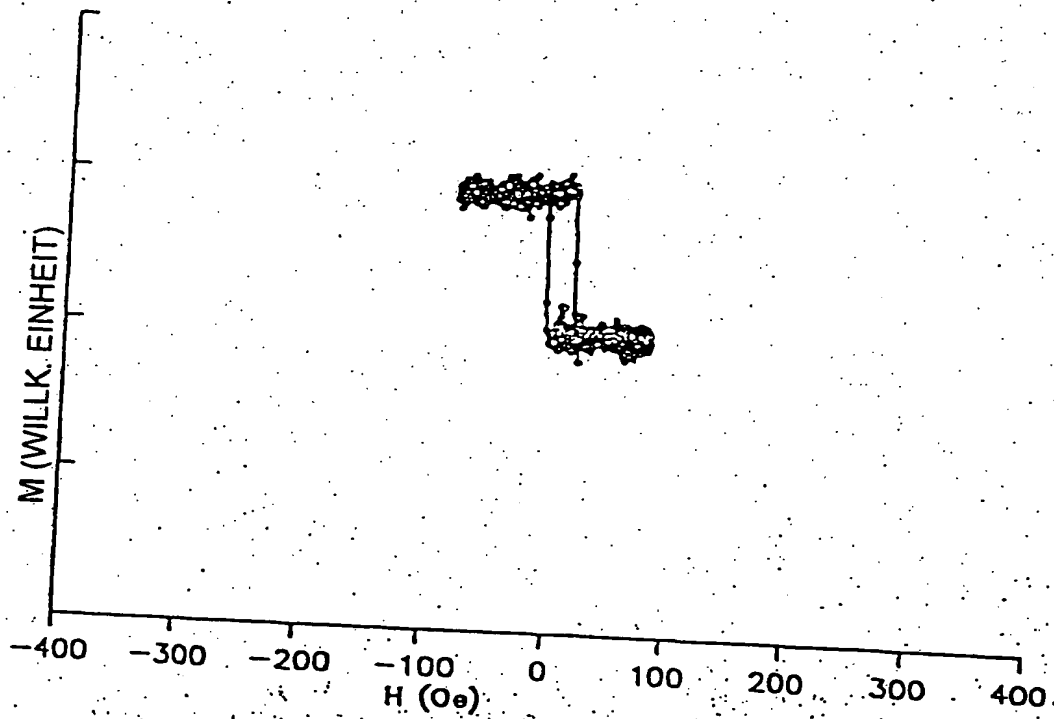
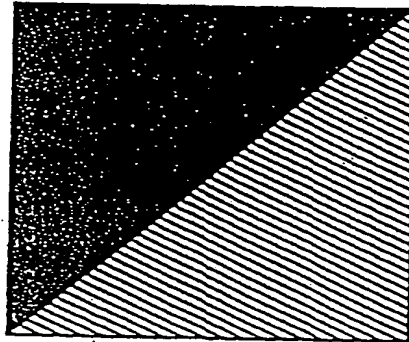
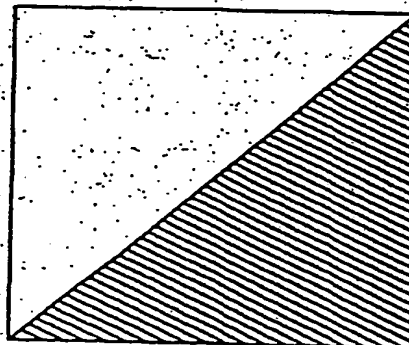


Fig.14C

*Fig.15A**Fig.15B*



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☒ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

This Page Blank (uspto)